

# 电机学

## 三相变压器及运行

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1

三相变压器的磁路

2

三相变压器的连接组

3

三相变压器绕组连接法及其磁路  
对电动势波形的影响

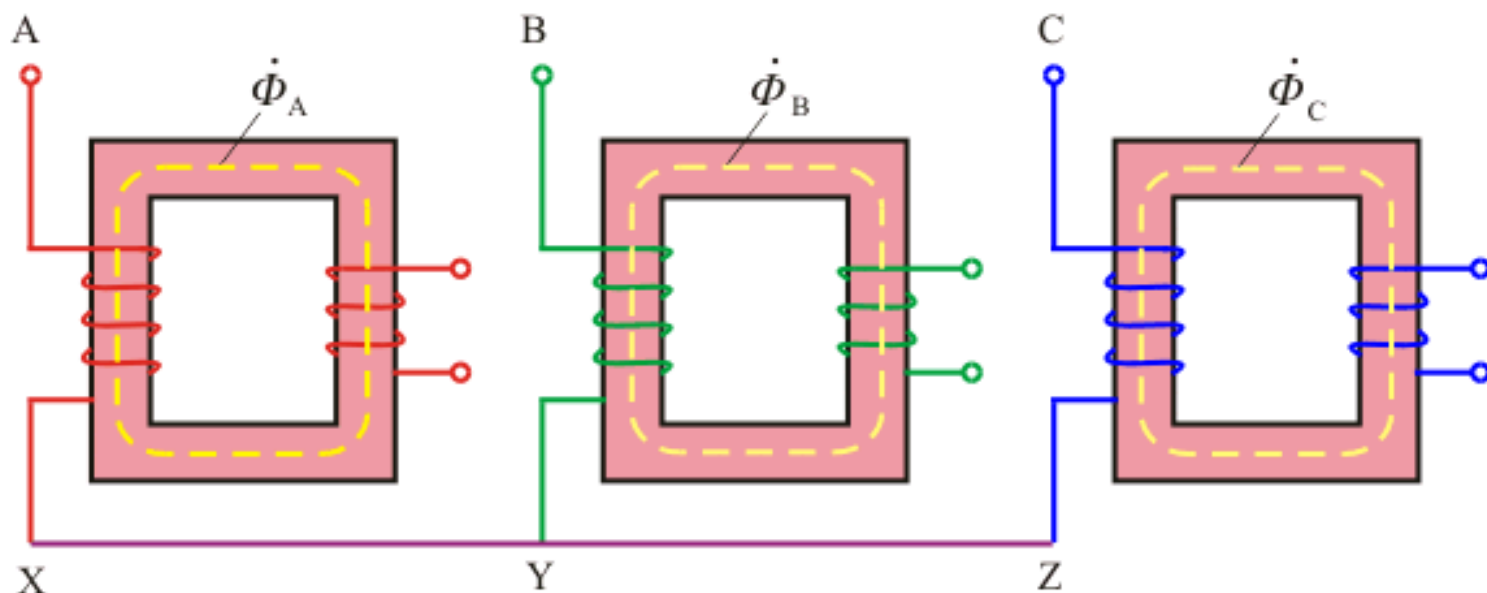
4

变压器的并联运行





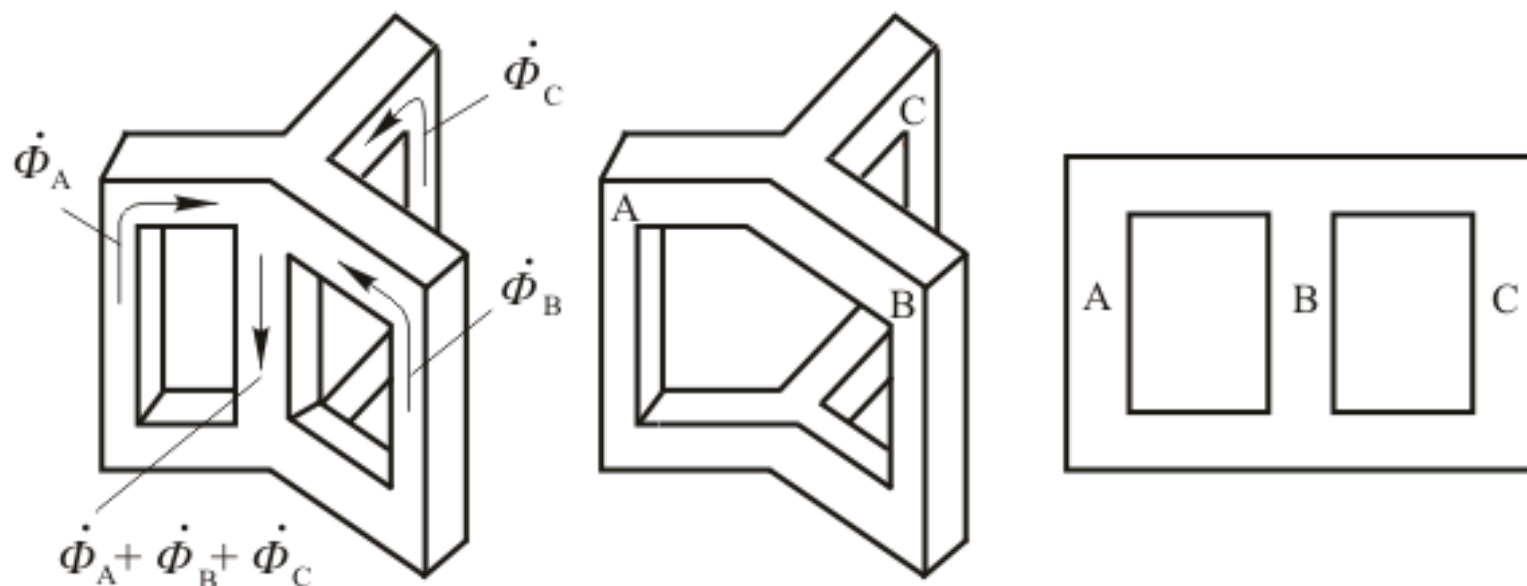
三相变压器的磁路系统可分为各相磁路彼此独立和各相磁路彼此相关两类



- 各相主磁通以各自铁芯作为磁路。——铁芯独立，磁路不关联
- 各相磁路的磁阻相同，当三相绕组接对称的三相电压时，各相的激磁电流和磁通对称。



# 三相变压器的磁路



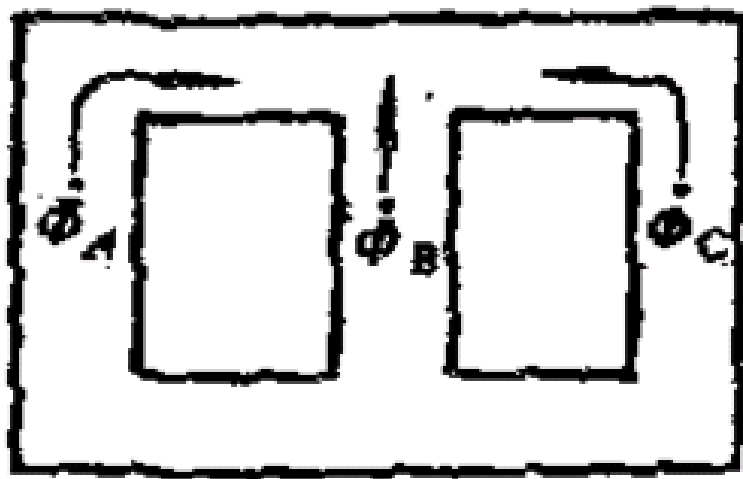
- 通过中间三个芯柱的磁通等于三相磁通的总和。
- 当外施电压为对称三相电压，三相磁通也对称，其总和  $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ ，即在任意瞬间，中间芯柱磁通为零。
- 在结构上省去中间的芯柱

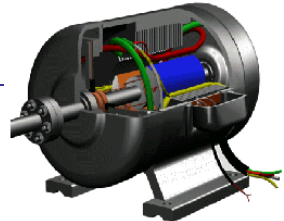




- 三相铁芯式变压器

- 三相铁心互不独立
- 三相磁路互相关联
- 中间相的磁路较短，令外施电压为对称三相电压，三相激磁电流也不完全对称，中间相激磁电流较其余两相为小。
- 与负载电流相比激磁电流很小，如负载对称，三相电流基本对称。



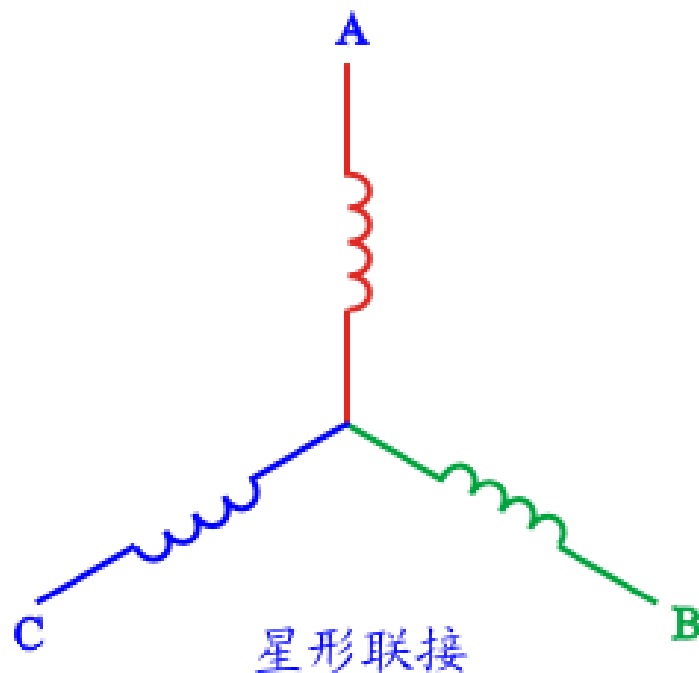


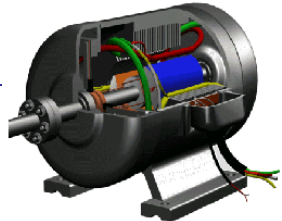
每个绕组有两个出线端，称为绕组首端和末端，符号标记规定如下

绕组名称	首端	末端	中性点
高压绕组	A, B, C	X, Y, Z	O
低压绕组	a, b, c	x, y, z	o

## 星形连接

- ① 绕组联结：首端向外引出，将末端联接在一起成为中性点。
- ② 代表符号：  
高压绕组—Y或YN(有中性点引出)  
低压绕组—y或yn(有中性点引出)
- ③ 相量图：电动势参考正向：由首端指向末端。





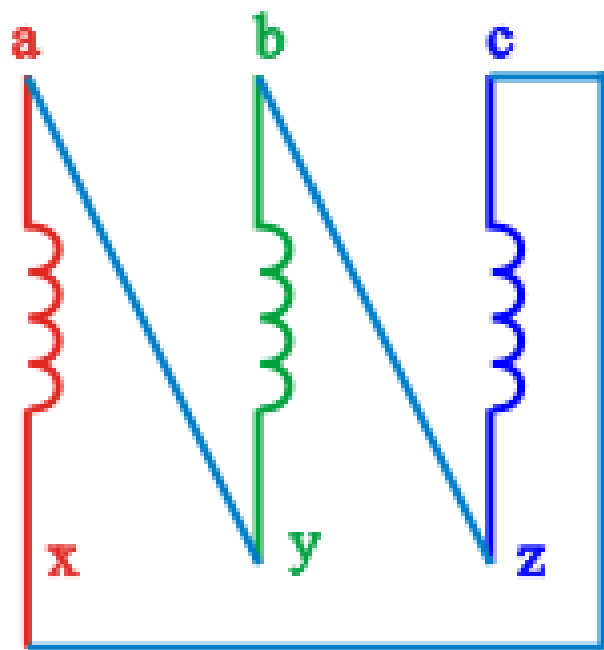
## 三角形连接

① 绕组联结： $A \rightarrow X \rightarrow C \rightarrow Z \rightarrow B \rightarrow Y$   
顺序联结成三角形。

② 代表符号：高压绕组——D  
低压绕组——d

③ 相量图：电动势参考正向：由首端指向末端。

- 1、Y, y 或 YN, y 或 Y, yn
- 2、Y, d 或 YN, d:
- 3、D, y 或 D, yn,
- 4、D, d。



三角形联接





## • 连接组别

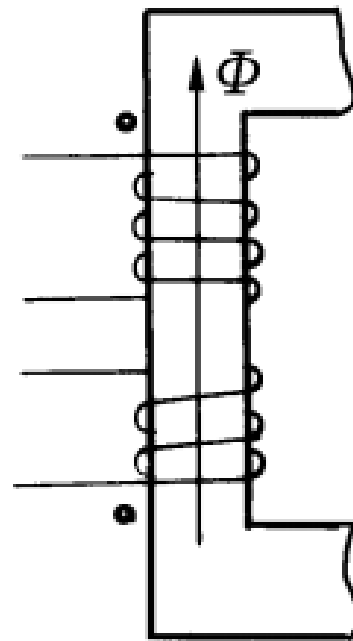
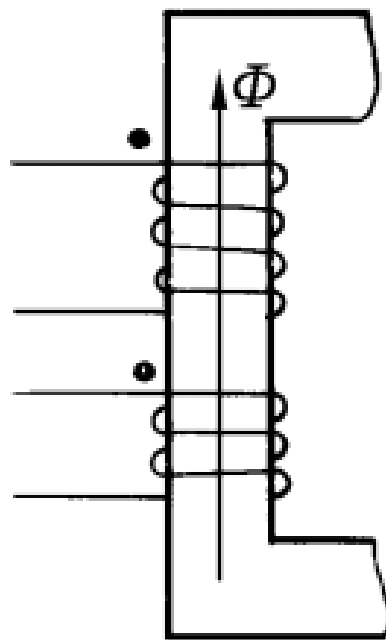
表示初级、次级（**线**）电势相位关系

### ➤ 同极性端

两个正极性相同的对应端点

- 变压器的初级、次级绕组由同一磁通交链，在某一瞬间高压绕组的某一端为正电位，低压绕组上也必定有一个端点的电位也为正

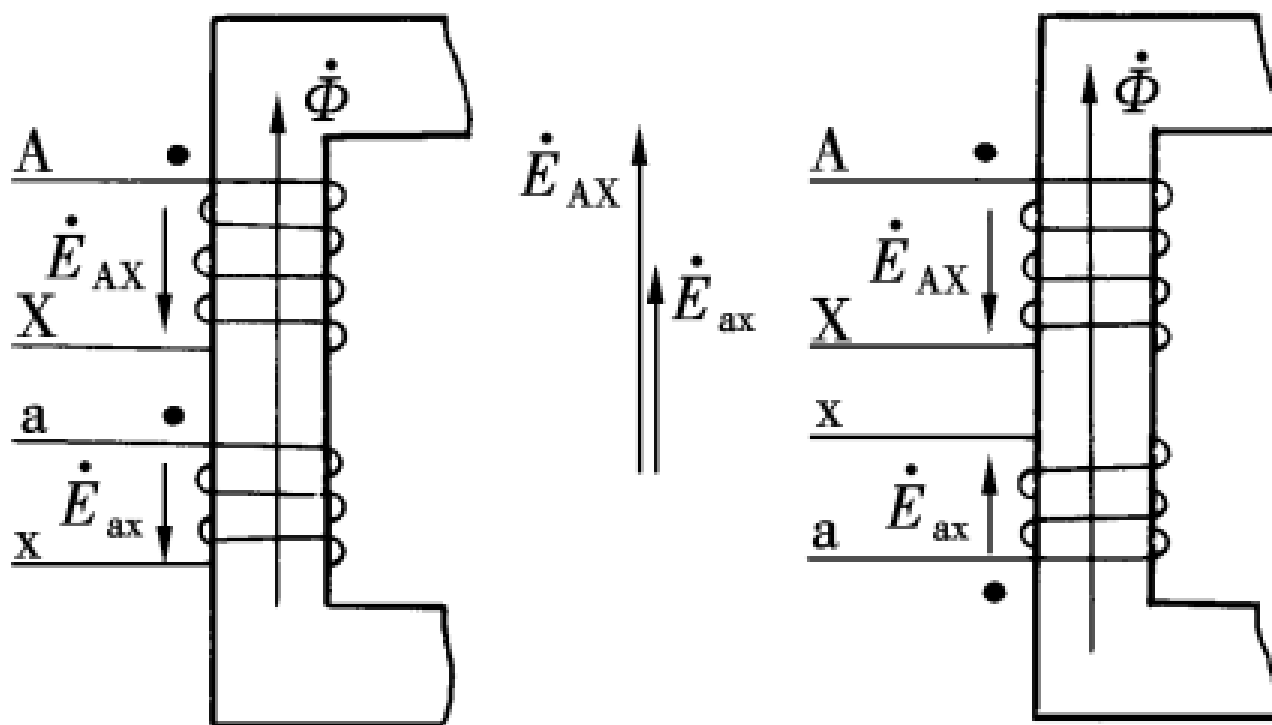
- 在绕组旁边用符号  $\bullet$  表示





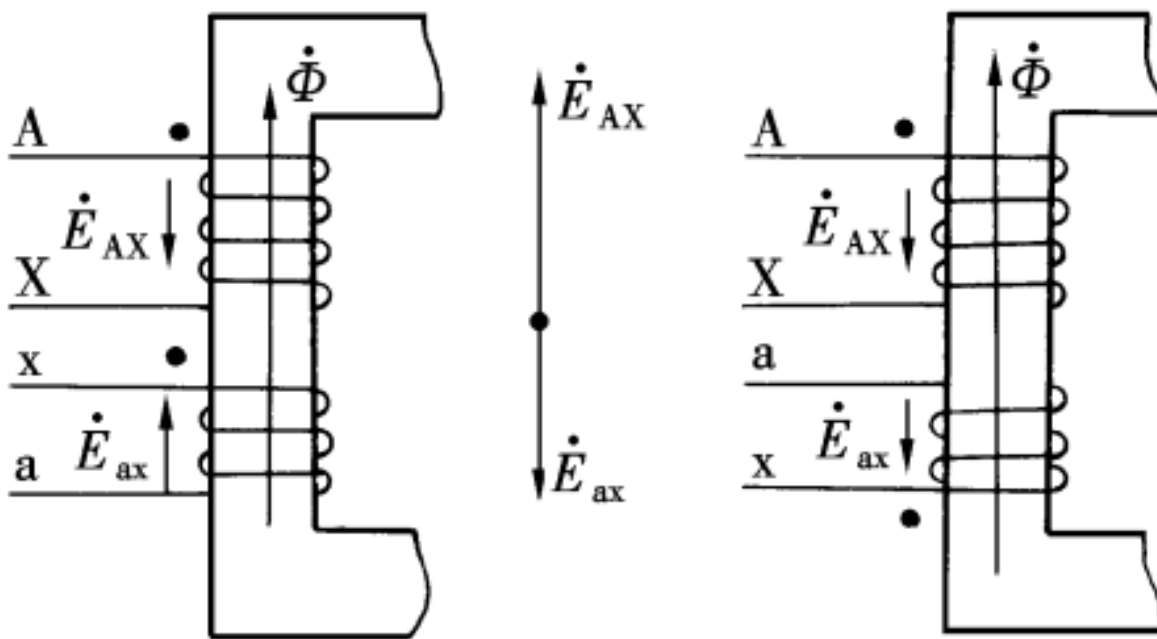


- 同极性端**相同首端**标志
  - 标有同极性端符号“•”的一端作为首端
  - 次级电势 $\dot{E}_{ax}$ 与初级电势 $\dot{E}_{AX}$ 同相位





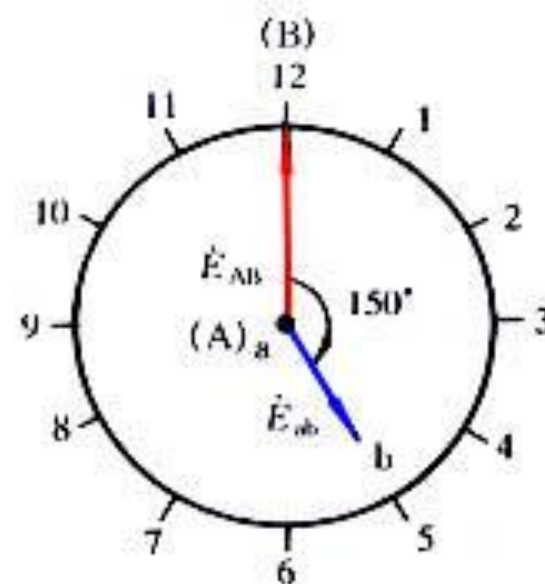
- 同极性端**相异首端**标志
  - 把初级绕组标有“•”号的一端作为首端，在次级绕组标有“•”号的一端作为末端，
  - 次级电势 $\dot{E}_{ax}$ 与初级电势 $\dot{E}_{AX}$ 反相





## 连接组的时钟表示

- **高压线电势**看作时钟的长针——  
固定指向时钟12点(或0点)
- **低压线电势**看作时钟的短针——  
代表低压电势的短针所指的时数作为绕组的组号。
- 同极性端相同首端标志：初级、次级电势相位差为零度，用时钟表示法为Ii0。
- 同极性端相异首端标志：初级、次级电势相位差为 $180^\circ$ ，用时钟表示法为Ii6。
- I, 1表示初级、次级都是单相绕组，0和6表示组号。单相变压器的标准连接组Ii0。



钟时序法( $150^\circ$ 时)

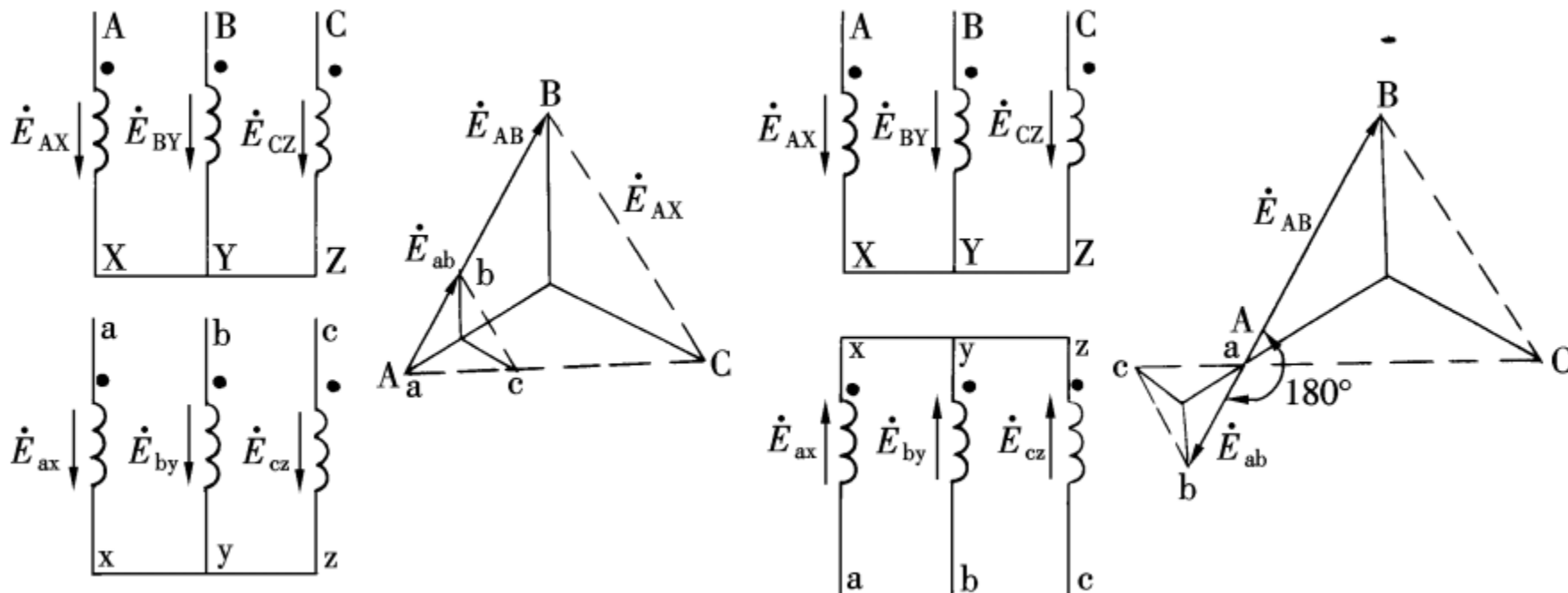


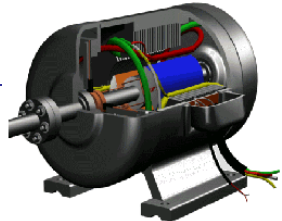


## 三相变压器的组别

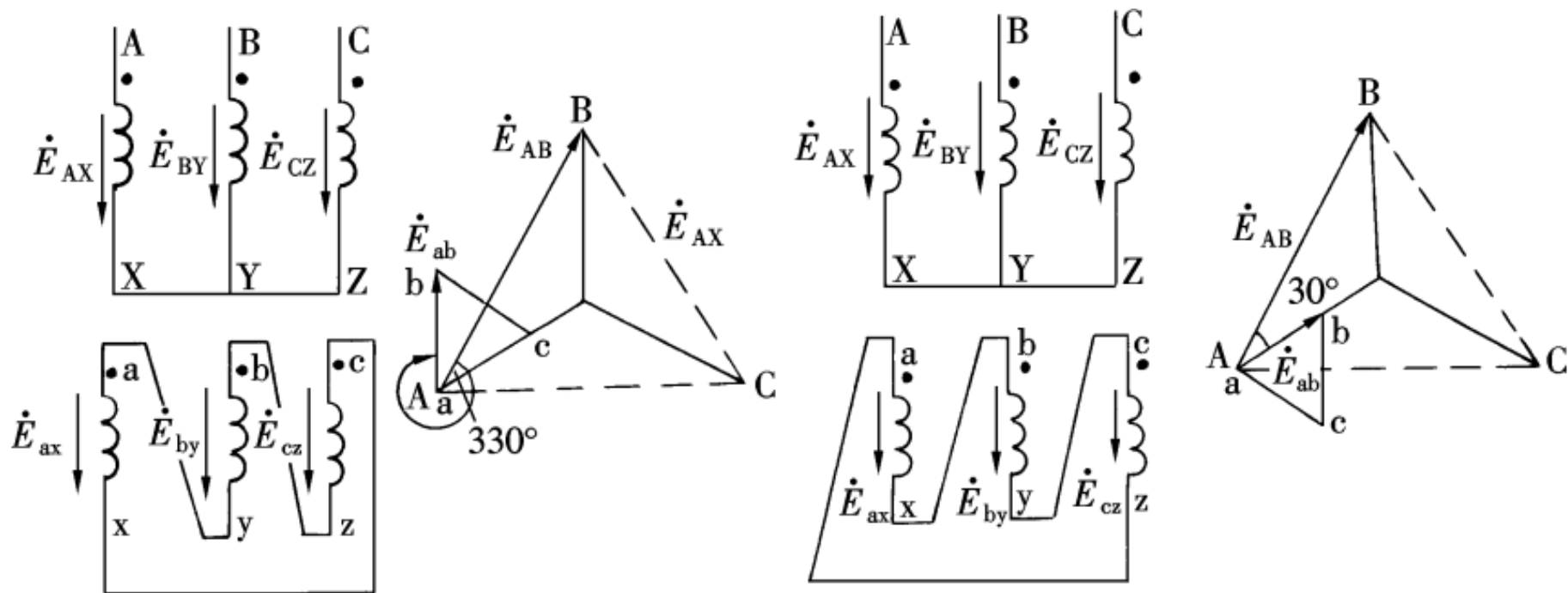
- 用初级、次级绕组的线电势相位差来表示
- 与绕组的接法和绕组的标志方法有关

### Yy连接



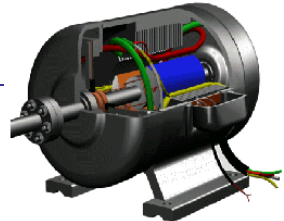


## Yd连接



- 五种标准连接组：①Y, yn0; ②Y, d11, ③YN, d11; ④YN, y0, ⑤Y、y0。
- YN--高压侧的中点可以直接接地或通过阻抗接地
- 对不同的应用场合，使用不同的标准组别

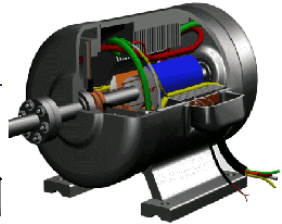




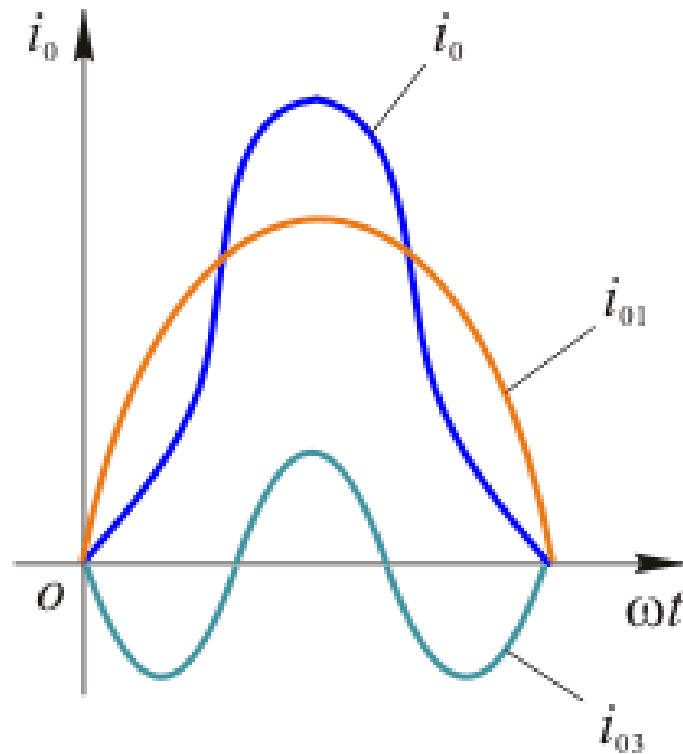
## 由连接组画接线图

1. 画出原方绕组的连接图
2. 画出原方电势相量三角形，标出AX, BY, CZ
3. 画出副方电势相量三角形，据连接组别，标出  
ax, by, cz
4. 在相量图中，同向绕组在同一铁芯柱上，注意同名端
5. 连接副方绕组



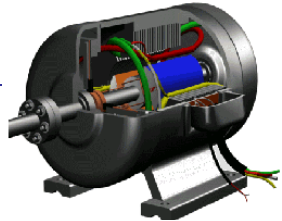


- 由于磁路饱和，磁化电流是尖顶波。分解为基波分量和各奇次谐波（三次谐波最大）。



- 在三相系统中，各相电流的三次谐波之间的相位差  $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ，即各相三次谐波电流在时间上同相位。

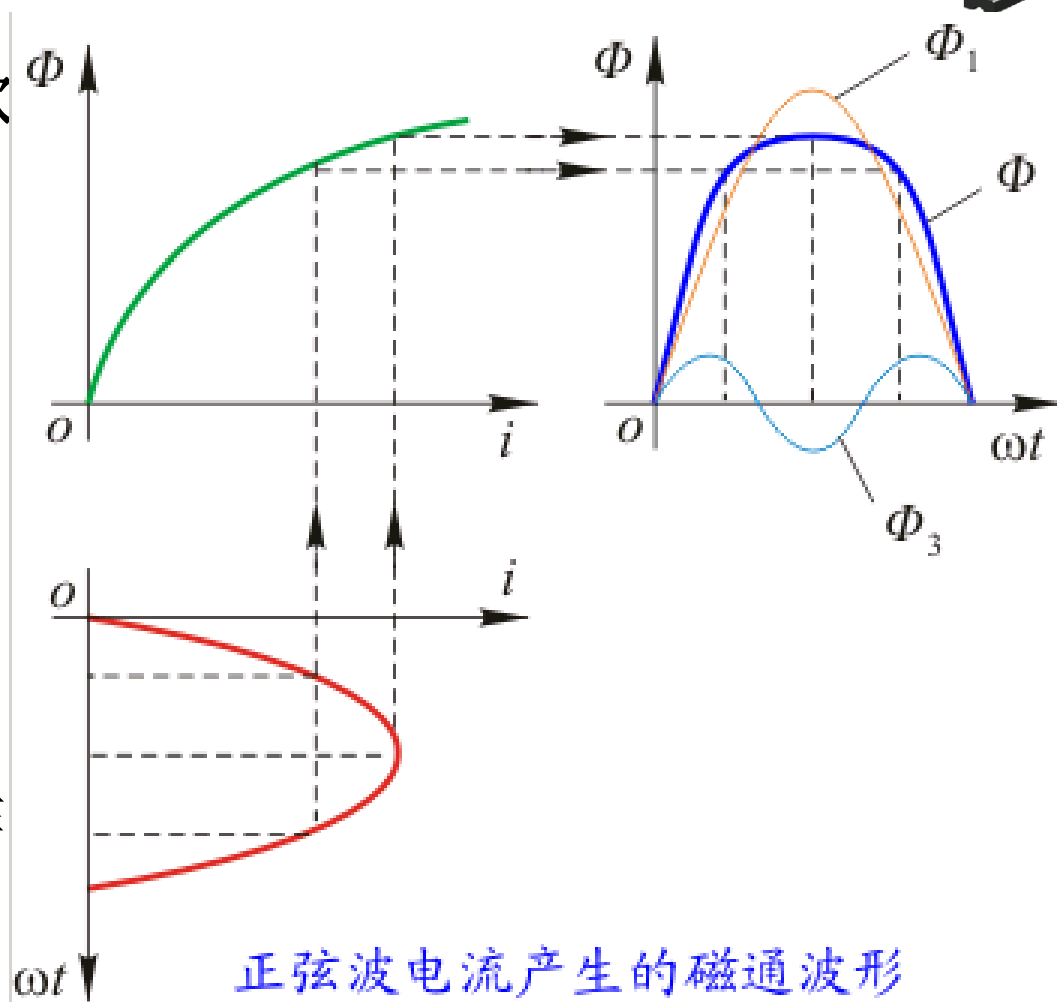




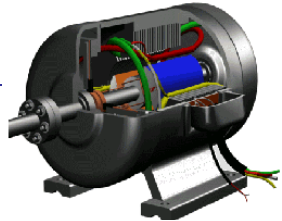
## 三相变压器组Yy连接

- 励磁电流中所必需的三次谐波电流分量不能流通——磁化电流正弦形

- 当励磁电流为正弦波时，从磁化曲线可知，此时磁通为非正弦，主磁通为平顶波，其中除了基波，还含有较强的3次谐波(以下忽略更高次谐波)，参见作图说明。







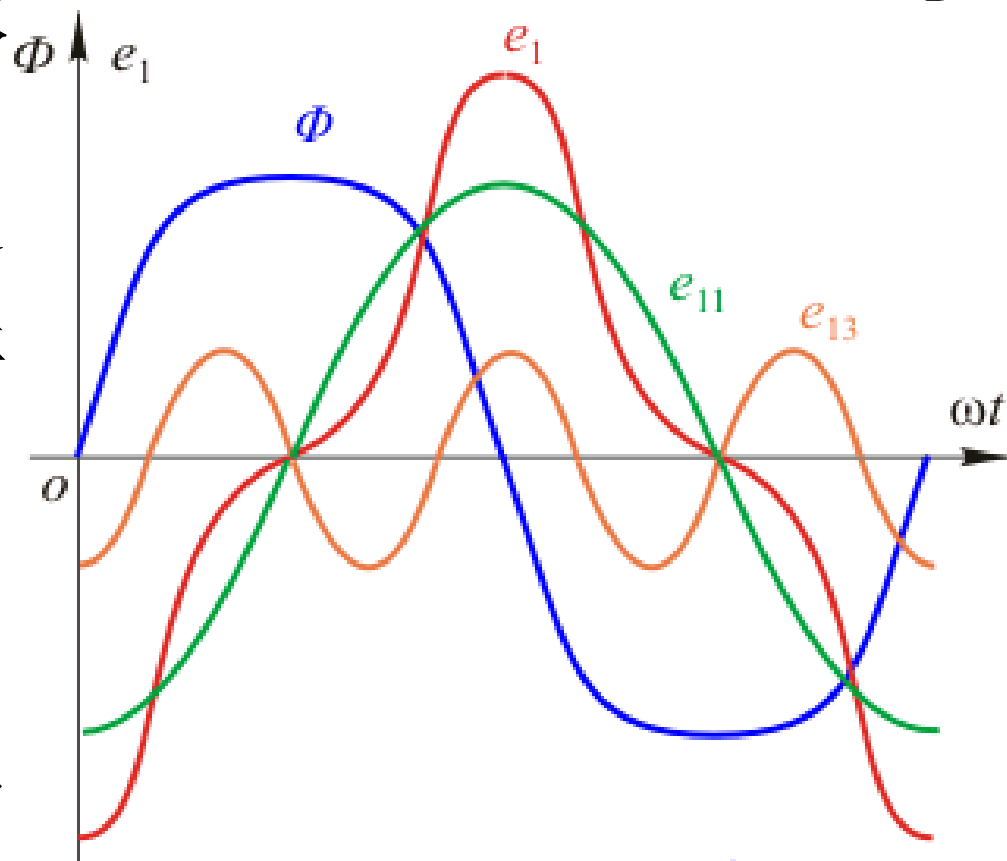
- 磁通波近似于平顶波
- 在各次谐波磁通中以三次谐波磁通幅度最大

- 三次谐波磁通与基波磁通有相同磁路，其磁阻较小三次谐波电势相当大。其振幅可达基波振幅的50%—60%。

$$E_3 = 4.44 f_3 N \Phi_{m3}$$

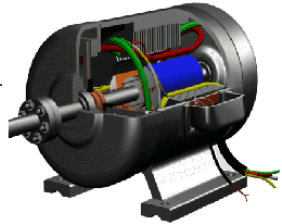
- 导致电势波形严重畸变。所产生的过电压有可能危害线圈绝缘。

- 规定：三相变压器组不能接成Y，y运行。



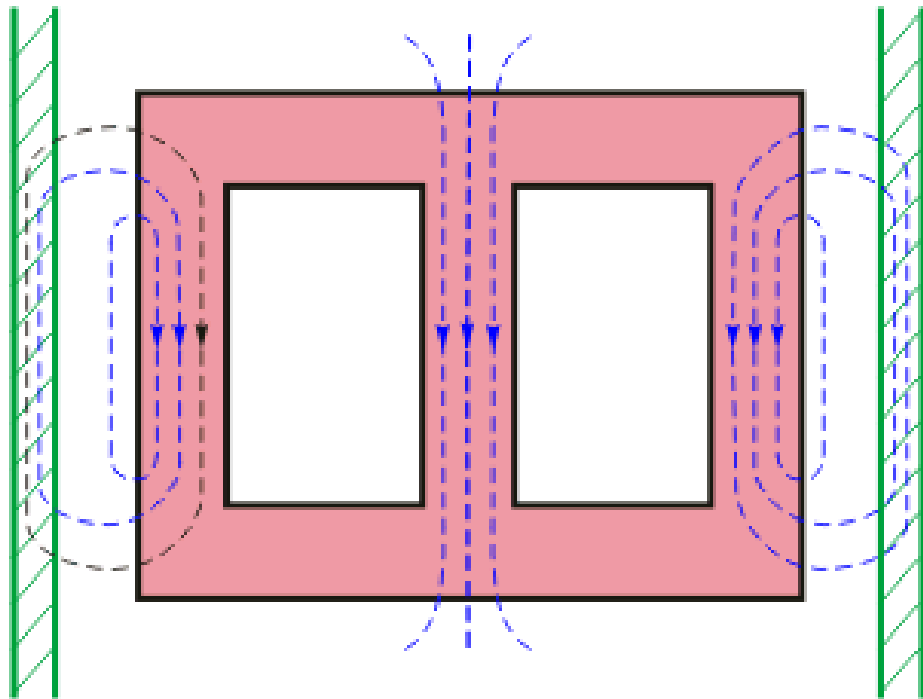
平顶波磁通产生的电动势波形

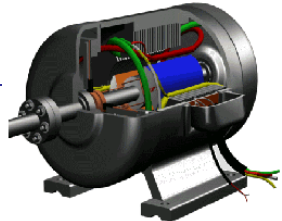




## 三相铁芯式变压器Yy连接

这种变压器的磁路是各相相互关联的，对于三次谐波磁通，三相同相位，它们不能沿铁心闭合，只有从铁轭处散射出去，穿过一段间隙，借道油箱壁而闭合，如图所示。这样三次谐波磁通就遇到很大的磁阻，使得它们大为削弱，使主磁通接近正弦波，因此相电势中三次谐波很小，电势波形接近正弦波。





## 三相变压器Yd连接

- 次级侧三角形接法：对三次谐波电势短路，在三角形电路中产生的三次谐波电流（**环流**）。该环流（供给励磁电流中所需的3次谐波电流分量）对原有的三次谐波磁通起去磁作用，三次谐波电势被削弱，量值是很小的。相电势波形接近正弦波形。
- 由初级侧提供了磁化电流的基波分量，由次级侧提供了磁化电流的三次谐波分量。
- 在高压线路中的大容量变压器需接成Y， d

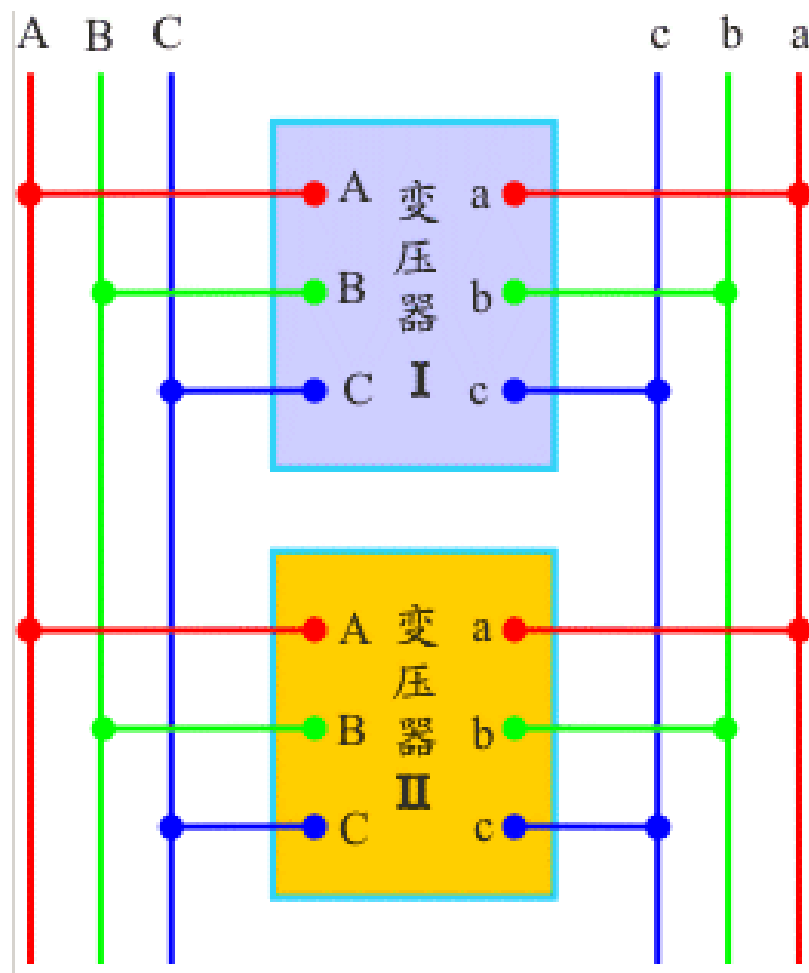


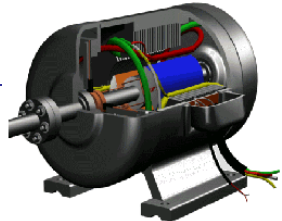


在大容量的变电站中，常采用几台变压器并联的运行方式，即将这些变压器的一次侧、二次侧的端子分别并联到一次侧、二次侧的公共母线上，共同对负载供电。

并联的运行的优点是：

- (1) **适应用电量的增加**——随着负载的发展，必须相应地增加变压器容量及台数。
- (2) **提高运行效率**——当负载随着季节或昼夜有较大的变化时、根据需要调节投入变压器的台数。
- (3) **提高供电可靠性**——允许其中部分变压器由于检修或故障退出并联。

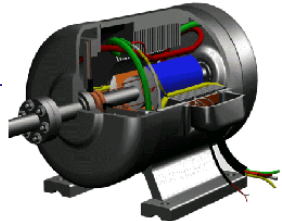




## 理想的并联运行条件

- **内部不会产生环流**——空载时，各变压器的相应的次级电压必须相等且同相位。
- **使全部装置容量获得最大程度的应用**——在有负载时，各变压器所分担的负载电流应该与它们的容量成正比例，各变压器均可同时达到满载状态。
- **每台变压器所分担的负载电流均为最小**——各变压器的负载电流都应同相位，则总的负载电流是各负载电流的代数和。当总的负载电流为一定值时。每台变压器的铜耗为最小，运行经济。

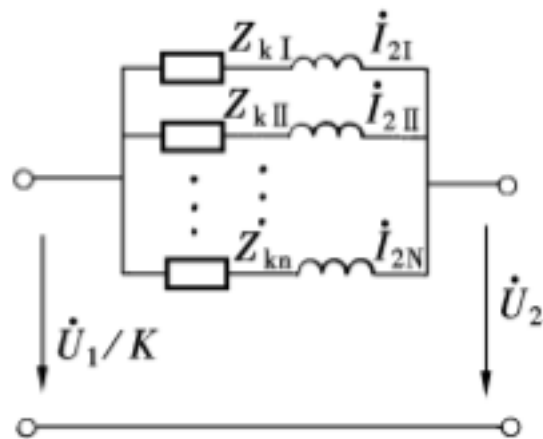
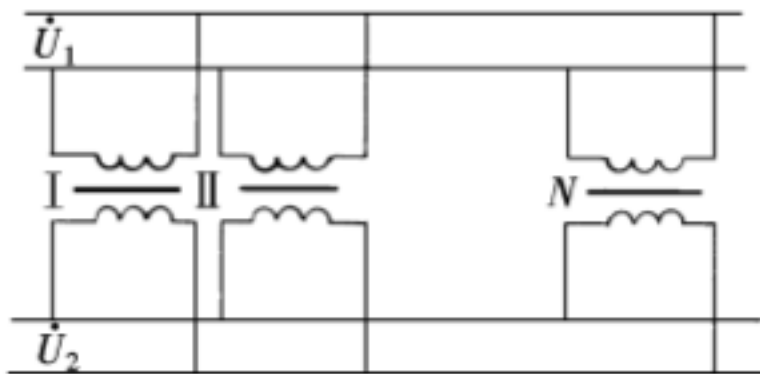


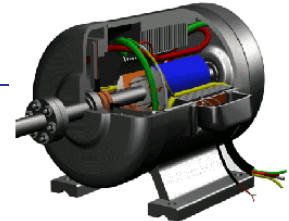


## 如何满足并联运行的条件

1. 并联连接的各变压器必须有相同的电压等级，且属于相同的连接组。不同连接组变压器不能并联运行。
2. 各变压器都应有相同的线电压变比。

实用上所并联的各变压器的变比间的差值应限制在0.5%以内。





1、由于连接组相同，变比一致，可使用并联电路的分流计算方法

$$\frac{U_1}{k} - U_2 = I_{2I}Z_{kI} = I_{2II}Z_{kII} = I_{2N}Z_{kN}$$

2、假设各变压器同时达到满载，则

$$I_{NI}Z_{kI} = I_{NII}Z_{kII} = I_{Nn}Z_{kn}$$

$$u_{kI}^* = u_{kII}^* = u_{kn}^*$$

要求各变压器短路电阻与短路电抗的比值相等。即要求**阻抗电压降的有功分量和无功分量应分别相等**

$$u_{k*} = u_{a*} + ju_{r*} = r_{k*} + jx_{k*}$$





## 并联运行负载分配计算公式

假设:各变压器有相同的变比, 但有不同的短路电压。

大容量变压器一般较大的短路电压。

各变压器的负载电流

$$\dot{I}_{2I} = \frac{1}{Z_{kI}} \left( \frac{\dot{U}_1}{k} - \dot{U}_2 \right)$$

$$\dot{I}_{2II} = \frac{1}{Z_{kII}} \left( \frac{\dot{U}_1}{k} - \dot{U}_2 \right)$$

...

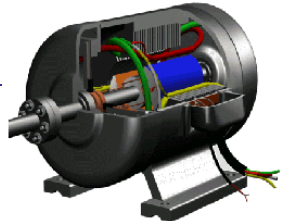
$$\dot{I}_{2n} = \frac{1}{Z_{kn}} \left( \frac{\dot{U}_1}{k} - \dot{U}_2 \right)$$

总负载电流

$$\dot{I}_2 = \left( \frac{\dot{U}_1}{k} - \dot{U}_2 \right) \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}$$







## 负载电流分配关系式

$$\dot{I}_{2I} = \frac{\frac{1}{Z_{kI}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_{2II} = \frac{\frac{1}{Z_{kII}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} \dot{I}_2$$

$$\vdots$$

$$\dot{I}_{2n} = \frac{\frac{1}{Z_{kn}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} \dot{I}_2$$

## 输出功率分配关系式

$$S_I = \frac{\frac{1}{Z_{kI}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} S$$

$$S_{II} = \frac{\frac{1}{Z_{kII}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} S$$

$$\vdots$$

$$S_n = \frac{\frac{1}{Z_{kn}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ki}}} S$$





$$\left| \frac{1}{Z_k} \right| = \frac{1}{Z_{k*}} \times \frac{I_N}{U_N} = \frac{1}{u_{k*}} \times \frac{S_N}{U_N^2}$$

…对每一相

复数运算简化为代数运算

$$S_I = \frac{\frac{S_{NI}}{u_{kI*}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{Ni}}{u_{ki*}}} S$$

$$S_{II} = \frac{\frac{S_{NII}}{u_{kII*}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{Ni}}{u_{ki*}}} S$$

$\vdots$

$$S_n = \frac{\frac{S_{Nn}}{u_{kn*}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{Ni}}{u_{ki*}}} S$$





$$S_I : S_{II} : \cdots : S_n = \frac{S_{NI}}{U_{kI}^*} : \frac{S_{NII}}{U_{kII}^*} : \cdots : \frac{S_{Nn}}{U_{kn}^*}$$

- 各变压器的负载分配与该变压器的额定容量成正比，与短路电压成反比。
- 如果各变压器的短路电压都相同，则变压器的负载分配只与额定容量成正比。各变压器可同时达到满载，总的装置容量得到充分利用。





## 实际上

- 一般电力变压器的 $u_{k*}$ 大约在0.05~0.105范围内，容量大的变压器 $u_{k*}$ 也较大。
- 如果 $u_{k*}$ 不等，则 $u_{k*}$ 较小的那台变压器将先达到满载。

$$(S_I / S_{IN}) : (S_{II} / S_{IIN}) = (1/U_{KI*}) : (1/U_{KII*})$$

当 $U_{KI*} < U_{KII*}$ 时， $S_I / S_{IN} > S_{II} / S_{IIN}$ 说明变压器 I 先满载

- 实用：为使总容量能够得到利用，要求并联运行的各变压器的容量接近，最大容量与最小容量之比不超出3:1；短路电压接近，差值不超过10%。

